



УДК 621.311

## **7.2. АВТОНОМНАЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА И ТРАНЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

### **STAND-ALONE HYDROPOWER PLANTS BASED ON MAGNETOELECTRIC GENERATOR AND TRANSISTOR CONVERTERS**

**Карачев Вадим Сергеевич**, магистрант второго года обучения каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: kara-vadim@yandex.ru, Тел.: +79618475767

**Алеко Михаил Николаевич**, магистрант второго года обучения каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: okel0001@mail.ru, Тел.: +79133832066

**Котин Денис Алексеевич** к-т. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: ni\_kotin@mail.ru. Тел.: +79232314734

**Vadim S. Karachyov**, Postgraduate Students, Novosibirsk State Technical University, 630092, K. Marx street, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: kara-vadim@yandex.ru. Ph.: +79618475767

**Michael N. Aleko**, Postgraduate Students, Novosibirsk State Technical University, 630092, K. Marx street, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: okel0001@mail.ru. Ph.: +79133832066

**Denis A. Kotin**, Cand. Sc., Novosibirsk State Technical University, 630092, K. Marx street, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: ni\_kotin@mail.ru. Ph.: +79232314734

**Аннотация:** В докладе рассматриваются вопросы разработки мини-ГЭС на базе синхронного генератора с постоянными магнитами и с активным выпрямителем и инвертором напряжения в качестве преобразователей энергии. Обсуждаются вопрос выбора силовых частей, структура системы управления и синтез регуляторов активного выпрямителя напряжения. Приведены результаты применения наблюдателя тока нагрузки АВН.

**Abstract:** The report discusses the development of mini-hydro -based synchronous permanent magnet generator and active rectifier and inverter voltage as energy converters . Discussed the question of choice of power units , control system structure and synthesis of active rectifier voltage regulators . The results of application of the load current observer VAR .

**Ключевые слова:** мини-ГЭС, магнитоэлектрический генератор; синхронный генератор с постоянными магнитами; активный выпрямитель напряжения; автономный инвертор напряжения; векторное управление генерированием энергии.

**Key words:** mini-hydro; magnetoelectric alternators; synchronous permanent magnet generator; voltage active rectifier; voltage autonomous inverter , vector control of energy generation.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Современная экологическая обстановка как в стране, так и в мире, постоянный рост территориально разнесенных и удаленных от линий электропередач сельскохозяйственных объектов с малой мощностью потребления, находящихся вблизи водных потоков с напорами до 10 м и мощностью до 1000 кВт, ставят задачи создания недорогих и энергоэффективных

автономных мини-ГЭС с автоматизированной системой управления с целью удовлетворения производственных и потребленческих нужд в электроэнергии. Территория страны богата на водные ресурсы, в частности на реки и быстрые ручьи, особенно территория Восточной Сибири, проблема необходимости освоения которой поднимается все чаще и чаще. Привлекательность такого возобновляемого природного ресурса, как реки, обусловлена обширными методами по

регулированию их энергии и относительная временная стабильность режима потока большинства рек дают применять простые и дешевые системы генерирования и стабилизации параметров производимой электроэнергии. Таким образом, в ходе проводимого исследования предполагается разработать автономную мини-ГЭС с автоматическим управлением напряжением и частотой электроэнергии на выходе.

### СИЛОВАЯ СХЕМА

Сравнительный анализ существующих решений проектирования мини-ГЭС с небольшими напорами показала, что наиболее простым и дешевым в строительстве и эксплуатации является отводящий канал с гасителем [1, 2] и синхронным генератором на постоянных магнитах (СПГМ) [2]. При этом, по мнению многих разработчиков [2, 3], СГЭЭ на базе СПЧ, а именно магнитоэлектрических генераторов (МЭГ), являются наиболее универсальными, могут использоваться в установках любого класса и любой мощности, они позволяют максимально реализовать достоинства гидротурбины с переменной скоростью вращения.

Более того, система АГПЧ без дополнительного источника реактивной мощности не могут работать в автономном режиме, что нам совершенно не подходит. Так же изготовление многополюстных МЭГ дает возможность отказаться от мультипликатора [3], что в свою очередь снизит материальные затраты и повысит надежность.

Управление системой на базе МЭГ реализуемо преобразователями следующих типов: В-ПСН-ИН, УВ (В)-ИТ, УВ(ИН)-ИН, НПЧ с ЕК. Для мощных автономных систем генерирования электрической энергии, в которых механическая энергия вращающегося с переменной частотой вала преобразуется в электрическую энергию переменного тока, перспективной является система, построенная по схеме «синхронный генератор с постоянными магнитами – активный

выпрямитель – инвертор напряжения» (рис. 2) [2]. СГЭЭ такого типа реализует полный набор режимов, требуемых от систем генерирования электрической энергии (ЭЭ) для мощных автономных систем, а именно: режим генерирования при работе на нелинейную, несимметричную и нестационарную нагрузки, режим электростартерного запуска гидротурбины, и др. В связи с революционными изменениями в области интеллектуальной силовой электроники (появились новые, полностью управляемые мощные высоковольтные полупроводниковые ключевые элементы и специализированные цифровые микроконтроллеры с высокой производительностью) современные устройства преобразования параметров электроэнергии в качестве элементной базы для силовой схемы преобразователей используются, как правило, транзисторные IGBT и MOSFET модули, работающие в ключевом режиме, что способствует формированию заданного качества электроэнергии используя ШИМ с высокой частотой преобразования.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ АВН

Рассмотрим математическое описание типового трехфазного мостового активного выпрямителя напряжения (АВН), работающего в режиме ШИМ. Силовой схеме АВН соответствует схема замещения, представленная на рис. 1.

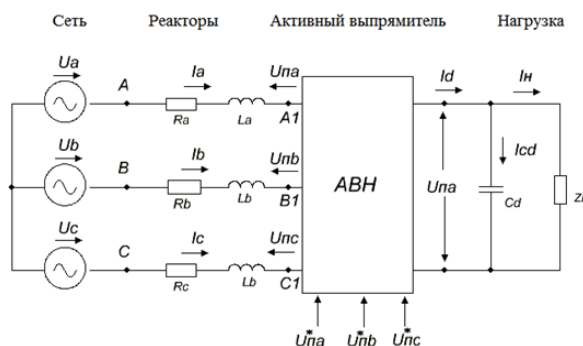


Рис. 1. Схема замещения выпрямителя

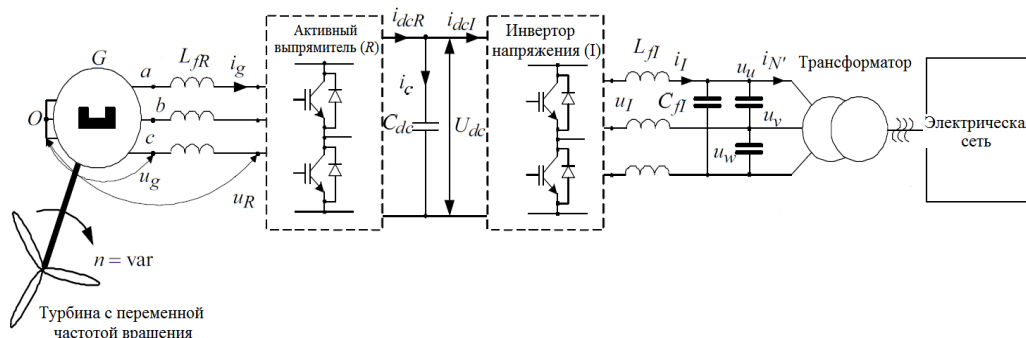


Рис. 2. Схема силовой части системы СГ-ВН-ИН

В связи с периодическим изменением во времени анализируемых величин в цепи переменного тока уравнения АВН целесообразнее записывать не в фазных, а в преобразованных переменных с использованием трехмерной ортогональной системы координат  $0xyz$ , оси которой вращаются в пространстве с произвольной скоростью  $\omega_k$ . Использование именно трехмерной системы преобразованных координат позволяет наиболее просто учесть в математической модели АВН различные алгоритмы ШИМ путем введения несущего и предмодулирующего сигналов по координате  $z$  [4].

Учитывая высокую частоту коммутации ключей в режиме ШИМ, для анализа главных тенденций переходных и установившихся режимов активного выпрямителя целесообразно использовать его более простую эквивалентную непрерывную модель. Такая модель получена при непрерывной аппроксимации его дискретной коммутационной функции. Уравнения непрерывной модели АВН в скалярной форме записи имеют следующий вид:

$$U_x = U_{I\pi} + RI_x + L \frac{dI_x}{d\tau} - \omega_k LI_y;$$

$$U_y = U_{I\pi} + RI_y + L \frac{dI_y}{d\tau} - \omega_k LI_x;$$

$$f_{I\pi} = \frac{U_{I\pi}^*}{2U_0};$$

$$f_{I\pi} = \frac{U_{I\pi}^*}{2U_0};$$

$$U_{I\pi} = f_{I\pi} U_d;$$

$$U_{I\pi} = f_{I\pi} U_d;$$

$$I_d = \frac{3}{2} (f_{I\pi} I_x + f_{I\pi} I_y);$$

$$I_d - I_n = C_\Phi \frac{dU_d}{d\tau};$$

$$\omega_k = \frac{d\theta_k}{d\tau}.$$

где  $U_0$  – амплитуда несущего сигнала ШИМ в схеме управления.

Уравнения непрерывной аппроксимации справедливы при условии

$$|U_{I\pi}^*| \leq U_0, \quad j = a, b, c,$$

т.е. тогда, когда ни один из фазных широтно-импульсных модуляторов не потерял управляемости при насыщении узла ШИМ.

На рис. 3 представлена соответствующая уравнениям структурная схема непрерывной модели АВН.

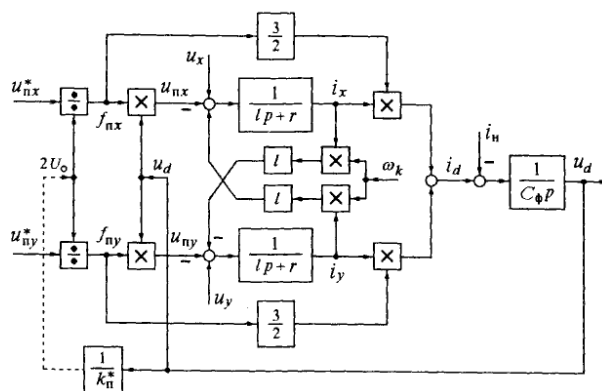


Рис. 3. Структурная схема непрерывной модели АВН

### НАБЛЮДАТЕЛЬ ТОКА НАГРУЗКИ АВН

Одним из способов повышения быстродействия системы векторного управления является организация компенсации тока нагрузки путем введения положительной обратной связи. Однако непосредственно измерить ток нагрузки не возможно, по этой причине необходимо построение наблюдателя. Для построения идентификатора используем адаптивную систему.

В качестве эталонной модели примем математическая модель объекта:

$$\frac{dU_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC}} (I_{нагр} - I_{\pi}).$$

Математическая модель наблюдателя:

$$\frac{d\hat{U}_{DC}}{dt} = \frac{1}{C_{DC}} (\hat{I}_{нагр} - I_{\pi}).$$

Вычитая из уравнений наблюдателя уравнения объекта, получим уравнения в отклонениях:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{C_{DC}} e, \quad (1)$$

где  $\varepsilon = \hat{U}_{DC} - U_{DC}$  – ошибка наблюдения напряжения ЗПТ,  $e = \hat{I}_{нагр} - I_{нагр}$  – ошибка наблюдения тока нагрузки – настраиваемый параметр.

Так как адаптивные системы являются не линейными, для синтеза алгоритмов идентификации применяется прямой метод функции Ляпунова. Согласно теореме Ляпунова для устойчивости алгоритма идентификации необходимо обеспечить положительную определенность функции Ляпунова и отрицательную определенность ее производной.

Зададимся следующей функцией Ляпунова [5]:

$$V = h\varepsilon^2 + \frac{1}{\lambda}e^2,$$

где  $h$  и  $\lambda$  — некоторые положительные константы.

### Производная функции Ляпунова

$$\dot{V} = 2h \frac{1}{C_{DC}} e \varepsilon + 2 \frac{1}{\lambda} \frac{de}{dt} e = 0.$$

Следовательно, закон адаптации нагрузок выпрямителя

$$e = \frac{h\lambda}{C_{DC}} \int \varepsilon dt. \quad (2)$$

Дополняя выражение пропорциональной частью получим пропорционально-интегральный закон формирования оценки нагрузки АВН

$$\hat{I}_{\text{нагр}} = k_H \int (\hat{U}_{DC} - U_{DC}) dt + k_{II} (\hat{U}_{DC} - U_{DC}).$$

Известно, что прямой метод функции Ляпунова позволяет лишь получить законы адаптации, однако не дает никаких рекомендаций по выбору их коэффициентов. Предлагается следующий подход по их определению. Рассмотрим совместно выражения (2) и (1), соответствующая структурная схема представлена на рис. 3.

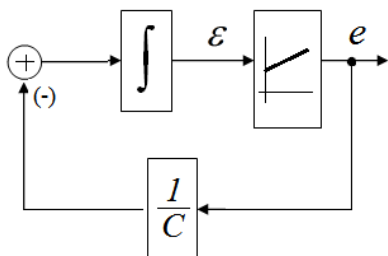


Рис. 3 Структурная схема идентификатора

Из условия разделения частот примем

$$k_{И.нагр} = \Omega^2_{набл}, \text{ где } \Omega_{набл} = \Omega_{KPT} / 2.$$

При настройке на симметричный оптимум принимаем

$$k_{П.нагр} = A_{набл} \Omega_{набл}, \text{ где } A_{набл} = 2.$$

Структурная схема алгоритма идентификатора представлена на рис. 4.

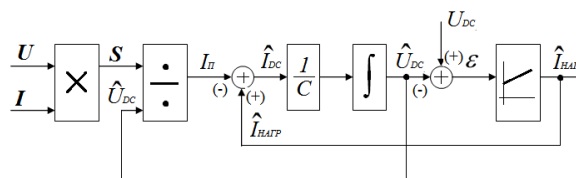


Рис. 4. Структурная схема алгоритма идентификатора

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карганбаев Б. А. Руководство по строительству и эксплуатации микро гидроэлектростанций (микро ГЭС). – Кыргызская Республика, 2011.-57 с.
2. Харитонов С. А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов: монография. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2011. – 536 с.
3. Шевченко А. Ф. Многополюсные магнитоэлектрические генераторы с дробными однозубцовыми обмотками для ветроэлектрических установок // Электротехника. – 1997. – №9. – С. 13-23
4. Шрейне Р. Т. Вопросы математического моделирования инверторных асинхронных электроприводов / Автоматизация и прогрессивные технологии: Материалы межотраслевого семинара-выставки (27-31 мая 1996 г.). – Новоуральск, МИФИ-2, 1996.–С. 110-113.
5. Барбашин Е. А. Функции Ляпунова [Текст], Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1970.